

晏明全,王东升,曲久辉,等. 2006. 典型北方高碱度微污染水体强化混凝的示范研究[J]. 环境科学学报, 26(6): 887-892

Yan M Q, Wang D S, Qu J H, *et al.* 2006. Enhanced coagulation on a typical high alkalinity and micro-polluted North-China source water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(6): 887-892

[免审稿件]责任编辑提示:本刊欢迎广大读者针对免审稿件提出各种意见

典型北方高碱度微污染水体强化混凝的示范研究

晏明全¹, 王东升^{1,*}, 曲久辉¹, 汤鸿霄¹, 何文杰²

1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

2. 天津市自来水公司, 天津 300040

收稿日期: 2006-03-24

录用日期: 2006-05-11

摘要:以高碱度、受有机物污染的典型北方水体为例,探索适宜的强化混凝技术.在水质调查的基础上,提出适合水质特征的强化混凝目标.研究了高碱度水体强化混凝技术方法.研究表明,可以通过 3 条技术途径提高水体中有机物的去除效率.其一在混凝前优化 pH,促进絮凝剂水解形成中聚体,AlCl₃ 在 pH 6 左右,FeCl₃ 在 pH 5 左右时,有机物去除率可以提高一倍左右;其二是强化沉淀软化;其三是絮凝剂优化.结合我国实际情况,通过对传统絮凝剂进行改性,研制出了适合我国北方水质特征的高效絮凝剂,能较传统絮凝剂将有机物去除率提高 30% 以上.

关键词:强化混凝; PACl; 天然水体有机物(NOM); pH

文章编号: 0253-2468(2006)06-0887-06

中图分类号: X52

文献标识码: A

Enhanced coagulation on a typical high alkalinity and micro-polluted North-China source water

YAN Mingquan¹, WANG Dongsheng^{1,*}, QU Jiuhui¹, TANG Hongxiao¹, HE Wenjie²

1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2. Tianjin City Water Supply Group Co. Ltd., Tianjin 300040

Received 24 March 2006;

accepted 11 May 2006

Abstract: The paper study the enhanced coagulation criterion for China through a case study of high alkalinity, micro-polluted north-china water. The paper render the seasonal enhanced coagulation target through bench test, based on water characteristics investigation. Three measures were found in the paper for this type water, the first is adjusting pH during coagulation in favor of mid-polymer product, which produce well at about pH 6 for AlCl₃, and pH 5 for FeCl₃, at those pHs the removal of TOC increase more than one time; The second is enhanced precipitative softening, the third is coagulant reform. We have succeeded reforming conventional coagulant for this water, which could increase 30% more NOM removal than conventional coagulants, which is very efficient in turbidity removal also.

Keywords: enhanced coagulation; PACl; natural organic matter; pH

随着工农业生产的发展,水源污染问题持续恶化;而随着生活水平的提高,人们对饮用水的水质要求越来越高.氯化消毒技术为饮用水生物安全性提供了一个有力的屏障;然而,消毒剂氯能与水体中的天然有机物(NOM)反应生成消毒副产物三卤甲烷、卤乙酸等“三致”物质,影响饮用水的化学安全性.确保有效去除或灭活微生物病原体,同时使

消毒副产物的生成量最低成为目前饮用水处理工艺面临的最大挑战.消毒前有效去除水体中的 NOM 从而减少消毒副产物的生成是降低消毒副产物的最佳途径(USEPA *et al.*, 1999; Jacangelo *et al.*, 1995; Randtke, 1988).强化混凝作为控制消毒副产物前驱物(NOM)的最佳技术(BAT)(Jacangelo, 1995; USEPA, 1999)得到了广泛应用.不同于传统

基金项目: 国家“863”高技术研究计划(No. 2002AA00601140)

Supported by the Hi-Tech Research and Development Program(No. 2002AA00601140)

作者简介: 晏明全(1976-),男,博士研究生; * 通讯作者(责任作者), E-mail: wgds@rcees.ac.cn

Biography: YAN Mingquan, (1976-), male, PhD, ; * Corresponding author, E-mail: wgds@rcees.ac.cn

优化混凝以实现浊度、有机物及消毒副产物前驱物的最大去除,最低的经济成本、产渣量、絮凝剂残余量为目标,强化混凝的目的是最大程度去除水体的消毒副产物前驱物。

NOM 的去除受水体碱度和有机物的含量及性质显著影响。碱度越高,有机物的去除率越低;水体中的部分有机物,尤其是溶解性人工合成有机物是通过混凝工艺难以去除的,混凝只能去除水体中能和絮凝剂作用的那部分有机物,这部分有机物含量越高有机物去除效率也越高。提高投药量和调节混凝前 pH 是提高强化混凝效率的有效手段在国外被广泛应用(USEPA, 1999; Crozes, *et al.*, 1995)。

中国北方水体具有较高的碱度,而且受工业污染较严重,传统混凝工艺对有机物的去除效率较低。在国家“十五”计划专项项目支持下,本研究以典型的中国北方水体——黄河水和滦河水为示范,探索研究适合中国北方高碱度微污染地表水的强化混凝技术与目标。

1 试验方法和材料(Materials and methods)

1.1 试验方法

试验所用原水取自天津芥园水厂,试验前检测原水的浊度、pH、UV₂₅₄及 TOC。烧杯实验采用二联混凝搅拌仪。向 1200 mL 反应器中加入 800 mL 原水,以 200 r·min⁻¹快速搅拌 30 s 后,用加样枪加入絮凝剂;反应 2 min 后转速调为 40 r·min⁻¹慢速搅拌,继续搅拌 10 min 后停止搅拌,静置 20 min 后在液面下 2 cm 处取样检测浊度、TOC、UV₂₅₄、pH。需要调节 pH 时,在投加絮凝剂前 30 s 按要求用加样枪加入适量的 HCl 或 NaOH。絮凝剂 FeCl₃ 和 AlCl₃ 在实验室用化学纯试剂配制;PACl 和 HPAC 为万水净水剂厂提供。

1.2 测定项目及方法

浊度由 HACH 2100N 型浊度仪(美国 HACH 公司)测定;pH 由奥立龍 MODEL828 pH 计(上海精密科学仪器有限公司)测定;TOC 由 Pheonix 8000 TOC 仪(美国)测定;UV₂₅₄值是将水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后在紫外分光光度计上用 1 cm 石英比色皿测定(UV-VIS 8500 Spectrophotomet)。

1.3 有机物表征方法

水体有机物树脂分级及超滤膜分级试验方法及材料见文献(Yan, 2006)。

2 试验结果(Results)

2.1 典型北方水体水质特征

天津同中国北方许多城市一样,属于严重缺水城市,在多雨的夏季和秋季,以滦河水为城市供水水源;在干旱的春节和冬季,滦河的水量不能满足供水需求,则从黄河下游引水。同为中国北方水系,因为具有相同的地质特征,滦河水和黄河水水质具有很大的共性,如高碱度(>120 mg·L⁻¹,以 CaCO₃计)、高 pH 值(>8.2)。同时,2 条河也受各自流域和人为因素以及气候因素的影响,其水质各自表现出不同的特征,如滦河水主要在夏、秋高温季节作为饮用水水源,此时藻类繁殖旺盛,使滦河水具有较高浊度、高叶绿素和高藻类数,蛋白质氮比重也较高(Davis *et al.*, 1981)。而黄河水流经中国西北、华北地区,地质复杂,其水中具有更高的碱度、硬度和盐含量。虽然黄河水和滦河水中 COD_{Mn} 平均含量均为 4.8 mg·L⁻¹,但有机物的成分及分布也有较大差别,在蛋白性氮比重、色度、藻类含量上也表现出差异。

表 1 和图 1、图 2 为典型季节黄河水和滦河水有机物成分的分析结果。从表 1 可以看出,滦河水中由于藻类的繁殖,颗粒物中有机物的比例较为显著,达到 15.63%。Leeheer 等(2003)认为,一般颗粒物中有机物所占比例不高于 10%。黄河水中,颗粒态有机物比例只占到 4.25%。分子量分级结果显示,滦河水中大分子(>3 × 10⁴)有机物也明显高于黄河水(图 1)。研究表明,SUVA 值与水体中芳香族有机物和不饱和性有机物具有很强的相关性,SUVA 是评价水中有机物性质的重要指标(Croué *et al.*, 2000; Edzwald *et al.*, 1985; OMelia *et al.*, 1987; Weishaar *et al.*, 2003)。Edzwald (1990)研究发现,SUVA 大于 4 时水体中有机物容易通过混凝工艺去除,反之则不易通过混凝工艺去除。黄河水和滦河水中的 SUVA 值均较低,分别为 3.41 和 2.11。

表 1 滦河水与黄河水成分比较

Table 1 Component comparison of Yellow River water with Luanhe River water

原水	POC/TOC	DOC/(mg·L ⁻¹)	UV ₂₅₄	SUVA
滦河水	4.25%	3.456	0.118	3.41
黄河水	15.63%	4.295	0.091	2.12

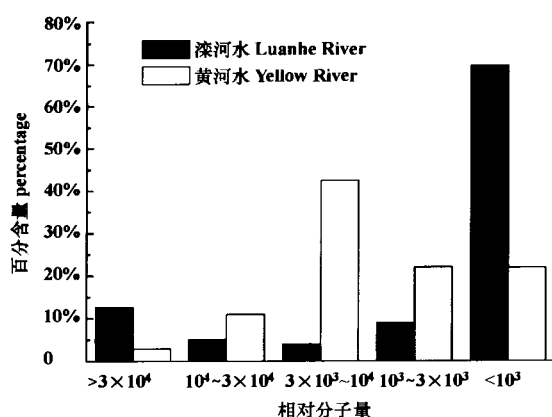


图1 黄河水和滦河水中有机物的相对分子量分布比较

Fig. 1 Comparison of molecule weight of NOM in Yellow River water and Luanhe River water

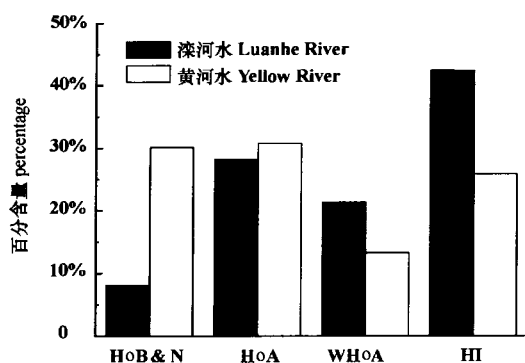


图2 黄河水和滦河水中有机物的成分分布比较(憎水性碱和憎水中性有机物(HoB & N)、憎水性酸(HoA)、弱憎水性(WHoA)、亲水性(HI))

Fig. 2 Comparison of NOM polarity in raw water of Yellow River water and Luanhe River water

滦河水和黄河水膜分级(图1)及树脂分级(图2)结果表明,中国北方水体受到亲水性有机物污染,黄河水和滦河水中憎水性有机物含量较低于通常值70%(O Melia *et al.*, 1987, Jacangelo *et al.*, 1995),尤其是滦河水。另外,憎水性有机物中,憎水碱性和憎水中性物质所占的比例较低。滦河水受低分子量的有机物污染严重,相对分子量小于1000的有机物占总量的70%,而黄河水这部分只有21%,其相对分子量介于 $1 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ 的有机物占较大比重(O Melia *et al.*, 1987),不同于其它水体。

值得指出的是,一般认为憎水性有机物较亲水性有机物具有更强的三氯甲烷生成能力,因而常用SUVA代替三氯甲烷生成势(Croué *et al.*, 2000; Edzwald *et al.*, 1985)。Owen(1995)研究表明,具有

较低SUVA值的亲水性有机物也具有一定的三氯甲烷生成能力,在管网中容易引起细菌再生;另外,很多人工合成有机污染物也具有较低的SUVA值,低SUVA有机物也值得重视。

2.2 季节性混凝特征

根据对混凝效率影响最为显著的几个指标,碱度、浊度、温度、藻类和有机物含量和性质,可以将天津原水按季节分为6个典型水质期:低温低浊黄河水(LTTH,一月和十二月);春季黄河水(SprH,二月至四月);早夏黄河水(ESumH,四月和五月);早夏滦河水(ESumL,五月至七月);高温高藻期滦河水(HTAL,七月至十月);秋季黄河水(AutH,十月,十一月)。试验研究了各种典型絮凝剂在各个典型水质期絮凝性能差异,文中只给出铁盐在6个典型水质期的试验结果对比(图3、图4)。从上图中可以看出,中国北方水体混凝效果表现出明显的季节性。滦河水中有机物去除率明显高于黄河水;黄河水也表现出季节性变化,温度越高有机物的去除率

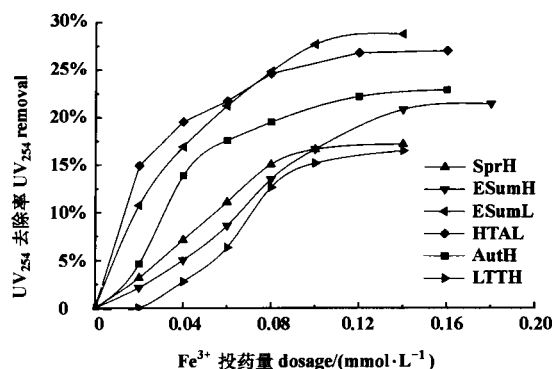
图3 各典型水质期絮凝剂铁盐对UV₂₅₄去除效果比较

Fig. 3 The removal of UV₂₅₄ by FeCl₃ in six water periods

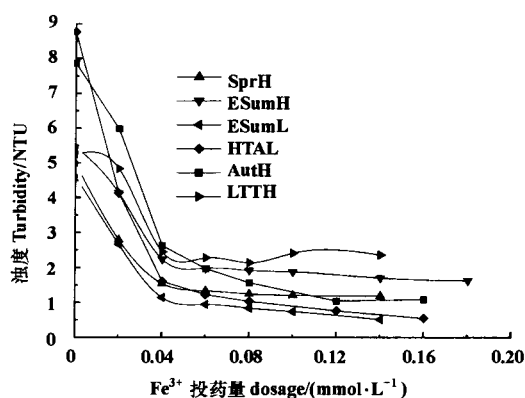


图4 各典型水质期絮凝剂铁盐对浊度去除效果比较

Fig. 4 The removal of Turbidity by FeCl₃ in six water periods

也越高. 秋季和早夏 UV_{254} 的去除率高于春季, 春季高于低温低浊期. 从图 4 可以看出, 浊度随季节也表现出一定的差异.

比较图 3、图 4 可以看出, 对有机物去除的最佳投药量明显高于对浊度去除的最佳投药量. 在天然水体中, 去除有机物的絮凝剂量取决于水体中不饱和和有机基团的量, 絮凝剂必须使水体不饱和和有机基团饱和. 传统的通过浊度去除确定投药量的方法不足以有效的去除水体中的有机物.

2.3 天津水体强化混凝目标的确定

参照美国环保局 (USEPA) 颁布的《Enhanced Coagulation and Enhanced Precipitative Softening Guidance Manual》的要求对中国北方水厂进行一年评估表明, 由于中国北方水体受到严重污染, 很难达到 USEPA 强化混凝第一步目标. USEPA 对较难处理的水质, 制定了第二步标准, 将静态试验每增加 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 絮凝剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, TOC 去除量增加不足 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时作为收敛点, 确定此时 TOC 去除率为强化混凝替代标准. 参照 USEPA 第二步混凝试验要求进行混凝试验, 选择了高温高藻期滦河水和秋季黄河水 2 个典型水质期以说明, 结果如图 5 所示.

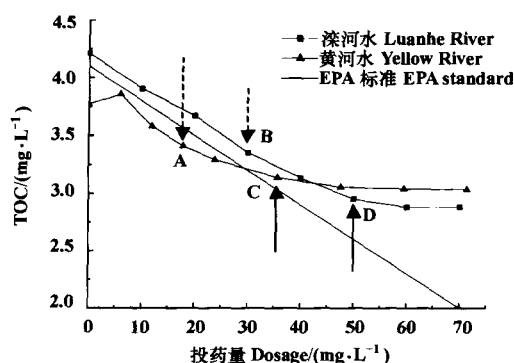


图 5 典型滦河水 and 黄河水 TOC 去除效果与 USEPA 标准比较

Fig. 5 The comparison of TOC removal by AlCl_3 for typical Yellow River water and Luanhe River water referring the USEPA protocol jar test

从图 5 可以看出, 由于天津原水水质受到严重污染, 参考 USEPA 强化混凝第二步标准, 滦河水强化混凝 TOC 目标去除率为 20.3% (B 点); 黄河水 TOC 去除率只有 8.7%, 离我国饮用水安全有一定差距 (A 点).

对于絮凝剂的最佳投药量有 2 种方式确定: 一是达到某有机物及浊度等指标目标的最低投药

量; 其二是当投药量继续增加对出水水质提高影响不是很显著时的投药量 (Randtke, 1988).

从图 5 可以看出, 对滦河水投药量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, TOC 去除率为 31% (D 点) 的目标是比较合适的, 继续增加投药量有机物去除没有明显提高. 对于黄河水, $35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ 的投药量 TOC 去除率为 12.7% (C 点) 的目标比较合适, 继续增加投药量对有机物的去除效果不是很明显, 反而会使部分颗粒物复稳, 影响对颗粒物的去除效果.

很多研究表明, UV_{254} 的值和 水体中的有机物量具有很好的相关性, 尤其芳香族有机炭 (Croué *et al.*, 2000; Edzwald *et al.*, 1985). Edzwald (1985) 研究发现 UV_{254} 比 TOC 和消毒副产物具有更好的相关性. 另外, UV_{254} 检测更简单、快捷, 不需要复杂的仪器, 是水厂日常检测指标, 用 UV_{254} 作有机物指标有很强的适用性. 根据图 3 的试验结果提出了典型天津水体季节性有机物 (UV_{254}) 和颗粒物 (浊度) 去除目标及对应投药量, 如表 2 所示. 可以看出采用强化混凝工艺, 能显著改善出水水质, 尤其是有机物的去除率. 保证饮用水的化学安全性. 值得指出的是, 此时的投药量并不是水厂运行投药量, 水厂可以通过系统优化、絮凝剂优选及调节混凝前水体 pH 来达到此目标.

表 2 天津水典型水质期强化混凝目标

Table 2 Target of Enhanced coagulation for Tianjin water

水质期	传统混凝目标			强化混凝目标		
	投药量/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	浊度/ NTU	UV_{254} 去除率	投药量/ ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)	浊度/ NTU	UV_{254} 去除率
SprH	0.04	1.54	7.0%	0.1	1.2	16.5%
ESumH	0.04	2.23	5.0%	0.14	1.7	20.0%
ESumL	0.04	1.14	17.0%	0.1	0.75	27.5%
HTAL	0.04	1.6	20.0%	0.12	0.8	27.0%
AutH	0.06	1.96	17.5%	0.12	1.	22.5%
LTTH	0.04	2.44	< 5.0%	0.1	2.4	15.0%

2.4 pH 对高碱度水体混凝影响

一般认为, 在低 pH 区, Fe、Al 以离子形态为主, 混凝以电性中和为主, 随着 pH 升高, Fe、Al 水解直至产生沉淀 $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$, 此时混凝以卷扫为主 (Duan *et al.*, 2003). 进一步研究无机絮凝剂混凝性能及机理发现, 无机絮凝剂混凝性能与其水解形态密切相关, 无机絮凝剂的各种水解形

态在混凝过程中表现出不同的絮凝机理和效果. 本文以普通铝盐、聚合铝及铁盐为例以说明. 部分试验结果如图 6 所示.

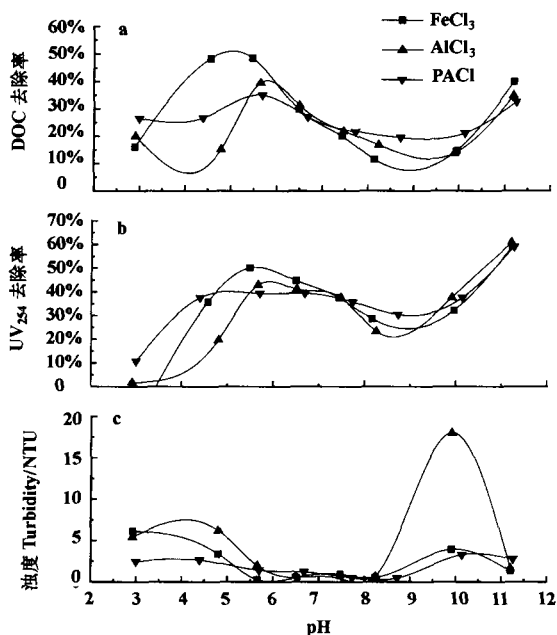


图 6 pH 对典型絮凝剂 FeCl₃、AlCl₃ 和 PACl 去除有机物及颗粒物的影响比较

Fig. 6 The effect of pH on DOC and Turbidity removal by coagulants, FeCl₃, AlCl₃, PACl at dosage 0.08 mmol·L⁻¹ (a. DOC removal ratio; b. UV₂₅₄ removal ratio; c. Residual turbidity)

碱度和 pH 决定絮凝剂投加后的水解形态. 铝盐投加后水解产物可以分为低体 Al₁、中聚体 Al₂、胶体 Al₃ 3 种形态. 在酸性条件下, 铝盐投加后水解形态以 Al₁ 为主; 随着 pH 升高, Al₂ 逐渐增加, 在 pH 6 左右, Al₂ 含量达到最高; 在偏碱性条件下, 铝盐投加后 Al₃ 含量显著升高, Al₂ 含量降低 (Wang *et al.*, 2004). Al₁ 具有很强的电中和性能, 但因为粒度较小, 不能使溶解性有机物脱稳沉淀; Al₂ 不仅具有很强的电中和性能, 而且具有较大粒度, 能使溶解性有机物和小粒径的颗粒物脱稳, 形成胶体态物质, 虽然不能沉淀去除, 但能被 0.45 μm 的膜截留下来; Al₃ 具有较大粒度, 表面局部具有强电簇, 能吸附水体中的有机物和颗粒物沉淀去除. DOC 的去除效率主要取决于 Al₂ 含量; 浊度的去除效率主要取决于 Al₁ 含量, Al₂ 能使颗粒物脱稳, 但絮体较细小, 容易复稳, 不易通过沉淀去除; UV₂₅₄ 的去除效率主要取决于 Al₂ + Al₃ 含量, 尤其是 Al₃ (Yan, 2006). 在 pH 6 左右, 铝盐投加后水解形态以 Al₂ 为主 (Wang

et al., 2004), 此时对有机物具有最佳去除效果, 在偏碱性条件下, 铝盐投加后 Al₃ 含量显著升高, 此时浊度去除效果较好, 而 DOC 去除效率降低. UV₂₅₄ 去除率在 pH 6~8 区间较稳定. 在酸性条件下, 铝盐对有机物的去除效果明显优于 PACl, 而在偏碱性区域, PACl 对有机物的去除效果优于金属盐. 表明聚合铝在预水解过程生成的中聚体较稳定, 受水体的碱度影响不明显, 对于高碱度的水体, 适当的预水解程度能促使具有较好混凝效果的优势形态形成, 提高絮凝剂的混凝效果. 铁盐表现出和铝盐较一致的规律, 但铁盐水解平衡点更偏向酸性区域. 可以看出, 铝系絮凝剂 AlCl₃、PACl 在 pH 6 左右对有机物具有最好的去除效果, 而铁盐在 pH 5 左右对有机物具有最好的去除效果.

从上图 6 可以看出, 中国北方水体中很高的 Mg²⁺ 浓度 (30 mg·L⁻¹), 当 pH 升高到 11 时, 开始生成 Mg(OH)₂ 沉淀, Mg(OH)₂ 沉淀同铝盐水解产物一样, 是带正电性的不定型结构, 具有较大的比表面积, 能像絮凝剂一样有效去除水体中的有机物、颗粒物和 CaCO₃ 沉淀. 此时, 浊度和有机物去除率显著升高.

因而, 对于高碱度中国北方水体, 可以通过 3 条途径提高有机物去除效率: 其一是在混凝前调整 pH 值, 促进混凝过程中优势水解形态生成; 其二是对絮凝剂进行改性, 提高混凝过程中优势形态的含量; 另外一条途径是强化沉淀软化, 即通过加入过量的碱, 使 pH 升高到 11 以上, 形成 Mg(OH)₂ 沉淀强化水体有机物去除.

2.5 絮凝剂改性优化

对于高碱度水体, 混凝前调节 pH, 相应的水处理设施也需要改造, 同时, 会增加水处理过程中药剂成本, 使水处理成本增加, 在水厂推广有一定的困难.

对于高碱度水体, PACl 较铝盐、铁盐对有机物的去除表现出明显的优越性, 但形成的絮体较细小、松散, 过量的 Al₃ 会使水体中有机物复稳. 因而, 研究开发了基于 PACl 高效复合絮凝剂 HPAC (Yan, 2006), 不仅能改善聚合铝中预制 Al₂ 形成的絮体沉降性能差的缺点, 而且能增加聚合铝的电中和能力和吸附架桥能力, 对中国北方高碱度典型水体中有机物及颗粒物有较好的去除效果. 以 HPAC 与铁盐、铝盐及 PACl 处理秋季黄河水为例说明 (图 7).

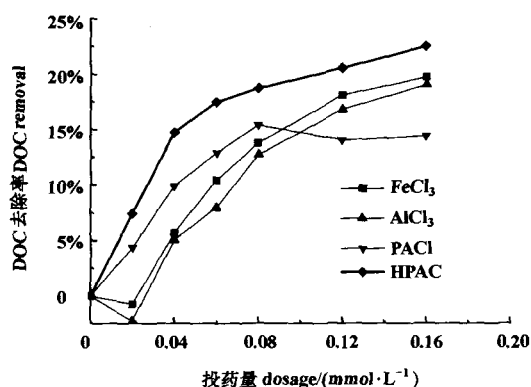


图7 典型絮凝剂 FeCl_3 、 AlCl_3 、PACl 与 HPAC 去除 DOC 效率比较

Fig. 7 Comparison of DOC removal efficiencies of four typical coagulants: FeCl_3 , AlCl_3 , PACl and HPAC

铁盐和铝盐是最常用的 2 种絮凝剂,对于中国北方高碱度水质,二者对有机物的去除没有明显的区别。无机高分子絮凝剂 PACl 在常规投药量不仅能显著提高有机物的去除率,节省投药量,尤其是在低温期,PACl 水解受温度显著影响不像普通铝盐那样显著,这种优势更为明显。但是,当 PACl 投药量增加到一定的量后,容易出现复稳现象,有机物去除率不及铝盐和铁盐。基于 PACl 开发的新型复合高效聚合铝(HPAC)能显著将 DOC 的去除效率提高 30% 以上,达到 USEPA 对此类水体 TOC 去除率 15% 的强化混凝目标。此外,HPAC 形成的絮体较为密实,具有很好的沉降性能,不易出现复稳现象。

深入研究表明,经过改性的 HPAC 能在较低的投药量下有效的去除憎水性酸、憎水性碱和憎水性中性有机物及大分子这类高 SUVA 有机物,这种优势在中试气浮工艺中显得更明显(Yan, 2006)。

中试及生产试验表明,使用絮凝剂 HPAC,混凝工艺和其它工艺具有很好协同效果。预氧化、固/液分裂、砂滤和深度处理工艺与絮凝剂 HPAC 集成研究将在后续的文章中讨论。

3 结论(Conclusions)

1) 中国北方水体不仅具有较高碱度,而且受到一定程度的工业污染,亲水性、小分子有机物含量高,属于通过混凝较难处理水体。

2) 提出适合中国北方水质特征的季节性强化混凝目标,能较传统混凝显著提高水体有机物去除效率。

3) 提出处理高碱度水体的 3 条技术途径。

4) 针对中国北方水质特性,成功对普通聚合铝进行改性,有机物去除效率提高 30% 以上。

References:

- Croué J P, Korshin G V, Leenheer J A, *et al.* 2000. Isolation, fractionation and characterization of natural organic matter in drinking water [C]. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, Denver: 324
- Davis J A, Gloor R. 1981. Adsorption of dissolved organics in lake water by aluminum oxide. Effect of molecular weight [J]. ES&T, 15 (10): 1223—1229
- Duan J M, Gregory J. 2003. Coagulation by hydrolysing metal salts [J]. Adv in Colloid and Interface Sci., 100-102(28): 475—502
- Edzwald J K, Van Benschoten J E. 1990. Aluminum coagulation of natural organic matter. In: Chemical water and wastewater treatment [C]. Conference proceedings of the 4. th. Gothenburg Symposium, Spain: Madrid, 341—359
- Edzwald, J K, Beker W C, Wattier L. 1985. Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursor [J]. JAWWA, 77 (4): 122—131
- Jacangelo J G, DeMarco J, Owen D M, *et al.* 1995. Selected processes for removing NOM: An overview [J]. JAWWA, 87(1): 64—77
- Leenheer J A, Croue J P. 2003. Characterizing Aquatic Dissolved Organic Matter [J]. ES& T 37(1): 18A—26A
- O'Melia C R, Yao, K, Gray K, *et al.* 1987. Raw water quality, coagulant selection, and solid-liquid separation [A]. // AWWA Annual Conference Seminar on Influence of Coagulation on the Selection [C]. Operation, and Performance of Water Treatment facilities, Kansas City, MO
- Owen D, Amy G, Chowdhury Z, *et al.* 1995. NOM characterization and treatability [J]. JAWWA, 87(1): 46—63
- Randke S J. 1988. Organic contaminant removal by coagulation and related process combinations [J]. JAWWA, 80(5): 40—56
- USEPA. 1999. Enhanced Coagulation and Enhanced Precipitative Softening Guidance Manual [M]. Washington, DC: EPA, Office of Water and Drinking Ground Water, EPA 815-R-99-012
- Wang D S, Sun W, Xu Y, *et al.* 2004. Speciation stability of inorganic polymer flocculant-PACl [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 243(1-3): 1—10
- Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* 2003. Evaluation of specific ultra-violet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. ES&T, 37(20): 4702—4708
- Yan M Q. 2006. Enhanced Coagulation and Treatment System Optimization for High Alkalinity and Micro-polluted Water [D]. Beijing: Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences (in Chinese)

中文参考文献:

- 晏明全. 2006. 高碱度微污染水体强化混凝及系统优化研究 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心。